CIMENTACIONES PROFUNDAS NORMALIZADAS CON BASE EN PILOTES PARA TORRES DE TRANSMISIÓN AUTO SOPORTADAS

C. J. Muñoz Black y V. Guerrero Flores
cjmb@iie.org.mx y guerrero@iie.org.mx

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Tel.: (7)3183811 ext. 7572 y 7584, Fax: (7)3182538
Av. Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Temixco, Morelos

RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología para el análisis de cimentaciones profundas con base en pilotes para torres de transmisión auto soportadas y se presenta el proceso de normalización para este tipo de cimentaciones. Se muestra un ejemplo de aplicación para una torre de transmisión en particular dadas las características mecánicas del suelo de desplante y se mencionan las ventajas que resultan del proceso de normalización.

SUMMARY

A methodology for the pile foundation analysis of self-supporting transmission towers is described. A normalization process for this foundation type is also presented. An application example is shown for a particular transmission tower and given soil mechanical parameters. The advantages of the normalization process are presented.

INTRODUCCIÓN

En las líneas de transmisión, uno de los elementos estructurales más importantes es la cimentación de las torres que en un gran número conforman la línea. El diseño individual de estos elementos para cada torre puede resultar, entre otras cosas, en un retraso de la ejecución del tendido de la línea. Desde este punto de vista, el proceso de normalización tiene como objetivo el hacer más eficiente el diseño de cimentaciones para este tipo de estructuras. El proceso de normalización que se presenta en este trabajo es aplicable a las cimentaciones profundas con base en pilotes.

METODOLOGÍA

Elementos Estructurales de la Cimentación

Los elementos estructurales que conforman la cimentación de una torre de transmisión auto soportada son: el dado, el cabezal, la trabe de liga y los pilotes. Todos estos elementos son de concreto reforzado y se diseñan de acuerdo con el ACI318, 1995.

Cargas Actuantes sobre las Cimentaciones

Las cargas actuantes sobre las cimentaciones corresponden a las reacciones resultantes del análisis estructural de las torres para cada una de sus patas y de estas reacciones se seleccionan las que producen los esfuerzos

máximos en la cimentación. Estas cargas actuantes están orientadas con respecto a tres ejes ortogonales como se muestra a continuación (véase Figura 1):

$F_A(-)$ Carga máxima de compresión en dirección vertical, en kN

$F_A(+)$ Carga máxima de tensión en dirección vertical, en kN

F_T Carga correspondiente en dirección transversal a la línea, en kN

F_L Carga correspondiente en dirección longitudinal a la línea, en kN

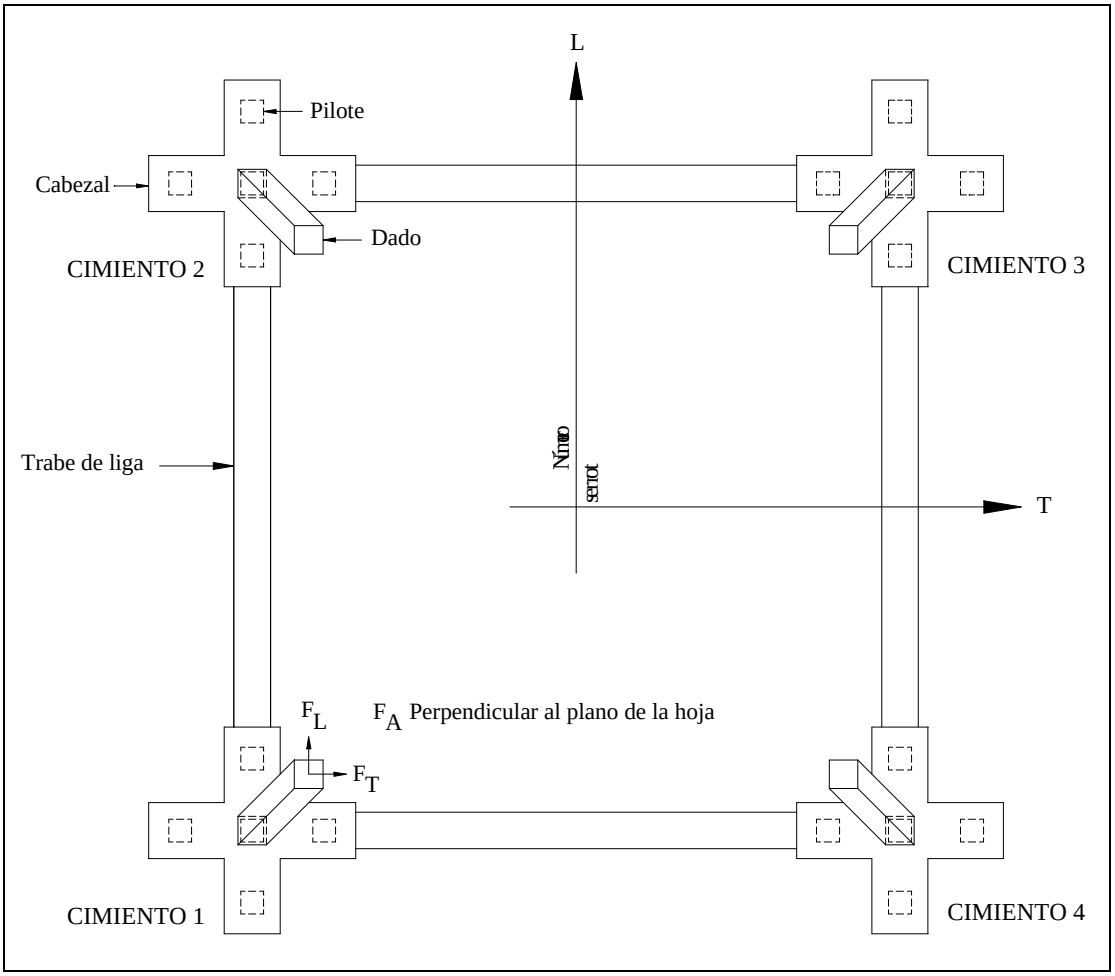


Figura 1 Cargas actuantes sobre la cimentación, cabezales orientados a 0º

Análisis por Carga Vertical

El dimensionamiento de los pilotes debido a carga vertical (compresión o tensión) se llevó a cabo considerando que el pilote más desfavorable debe cumplir el siguiente requisito:

$$P_{\text{máx}} \leq P_a = \frac{P_u}{FS} = \frac{P_{pu} + P_{fu}}{FS} \qquad (1)$$

Donde:

$P_{máx}$ Carga vertical máxima aplicada al pilote debido a las reacciones resultantes (kN).

P_a Capacidad de carga admisible del pilote (kN)

P_u Capacidad de carga vertical última del pilote (kN), calculada a partir de las propiedades de resistencia del subsuelo

FS Factor de Seguridad

P_{pu} Capacidad de carga última por punta del pilote (kN); igual a cero para fuerza vertical de tensión.

P_{fu} Capacidad de carga última por fricción del pilote (kN)

Capacidad de Carga Última por Punta del Pilote

Para el caso de suelos puramente cohesivos la capacidad de carga última por punta del pilote se determina mediante (Bowles, 1977):

$$P_{pu} = c N_c A_p \tag{2}$$

Donde:

c Cohesión promedio del suelo (kN/m^2)

N_c Factor de capacidad de carga del suelo

A_p Área transversal del pilote (m^2)

En la expresión (2) anterior:

$$N_c = 5.14(1.2 + d_c') \tag{3}$$

$$d_c' = \begin{cases} 0.4\left(l_p / B_p\right) & si \quad \left(l_p / B_p\right) \le 1 \\ 0.4\,\text{arctg}\left(l_p / B_p\right) & si \quad \left(l_p / B_p\right) > 1 \end{cases} \tag{4}$$

Donde:

l_p Longitud del pilote

B_p Ancho del pilote

Para suelos no cohesivos la capacidad de carga última por punta del pilote se obtiene con (Bowles, 1977):

$$P_{pu} = a g_s L N_q A_p \tag{5}$$

En esta ecuación:

a Coeficiente

$g_s L$ Presión vertical efectiva promedio en la punta del pilote (kN/m^2)

N_q Factor de capacidad de carga reducida del suelo

A_p Área transversal del pilote, (m^2)

Los valores de a y N_q se pueden obtener de las Figuras 2 y 3, respectivamente.

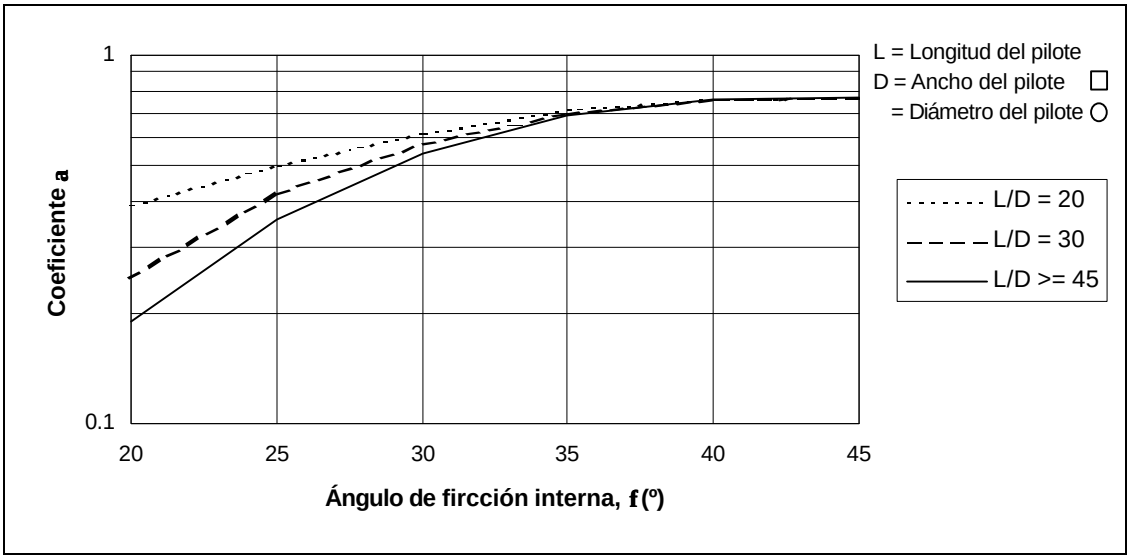


Figura 2 Coeficiente a para la capacidad de carga por punta de pilotes en suelos no cohesivos

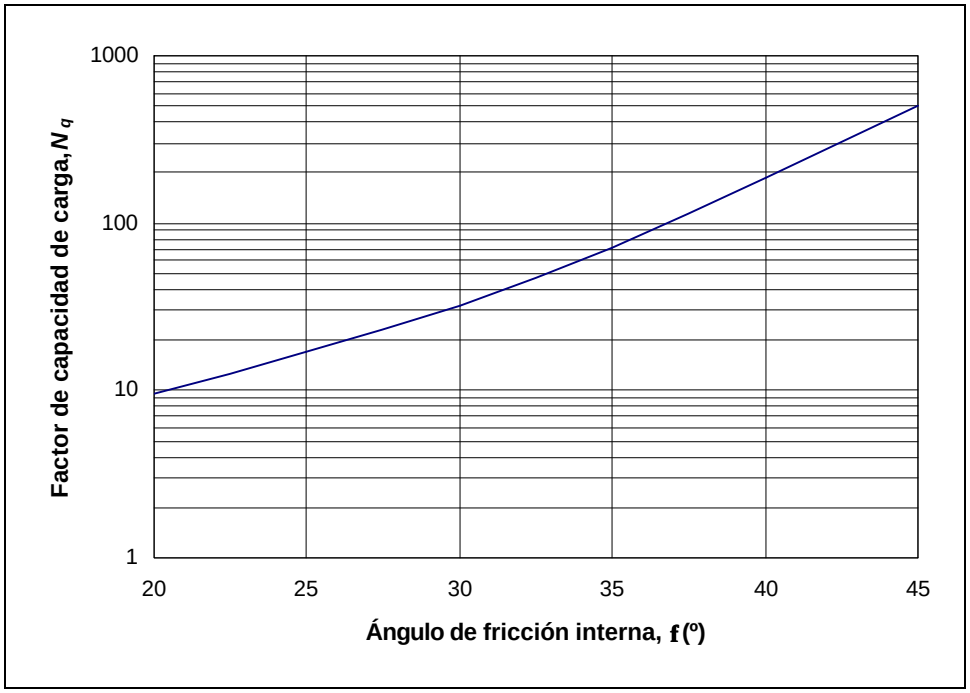


Figura 3 Factor de capacidad de carga por punta de pilotes en suelos no cohesivos

Capacidad de Carga Última por Adhesión (Fricción) del Pilote

La capacidad de carga última por adhesión del pilote para suelos cohesivos depende del tipo de suelo y de algunas de sus propiedades. Así, esta capacidad por adhesión se determina de acuerdo a lo siguiente (Bowles, 1977):

$$P_{fu} = \int_0^{l_i} a\, c\, p_p\, dy \qquad (6)$$

En esta ecuación:

a Factor de adhesión, se puede obtener de la Figuras 4.a, 4.b o 4.c, según sea el caso 1, 2 o 3, respectivamente (Tomlinson, 1996):
Caso 1: Pilotes hundidos a través de arenas o gravas arenosas
Caso 2: Pilotes hundidos a través de una capa superior de arcilla débil
Caso 3: Pilotes sin una capa superior diferente

c Cohesión promedio del suelo (kN/m^2)

p_p Perímetro del pilote (m)

l_i Longitud del pilote en el estrato considerado (m)

En el caso de suelos no cohesivos la capacidad de carga por fricción del pilote se obtiene a partir de:

$$P_{fu} = \int_0^{l_i} K_d\, p_p\, g_s y \operatorname{sen} d\, dy \qquad (7)$$

Donde:

K_d Coeficiente de presión lateral, el cual se puede obtener con el procedimiento que se describe en el siguiente párrafo

$g_s y$ Presión vertical efectiva promedio sobre el incremento dy del pilote (kN/m^2)

d Ángulo que se puede obtener de la relación d / f de la Figura 5 (º)

l_i Longitud del pilote en el estrato considerado (m)

El procedimiento para calcular el coeficiente de presión lateral, K_d , es el siguiente:

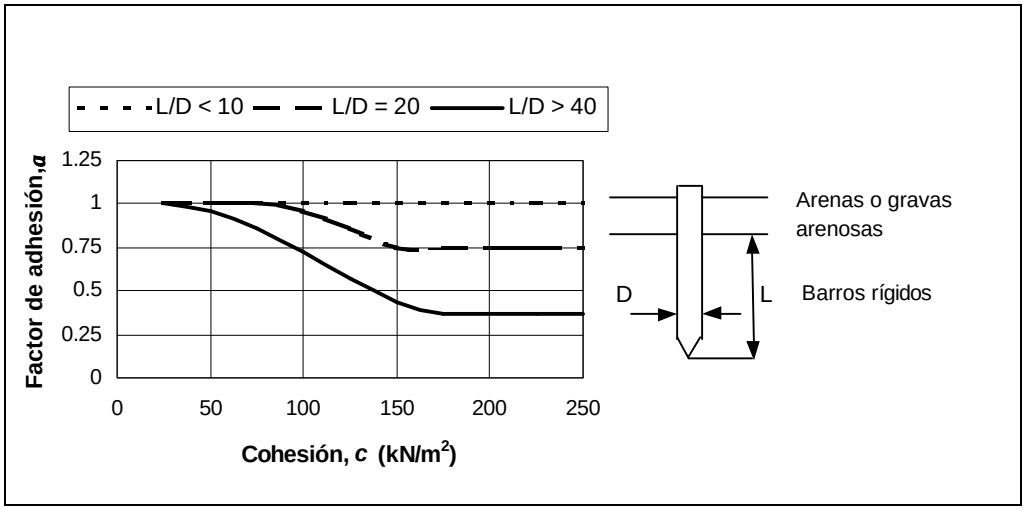
Paso 1 Calcular el volumen del pilote por unidad de longitud V (m^3/m) y obtener el valor de K_d según la Tabla 1 para el ángulo de fricción interna del suelo, f ; se puede interpolar para distintos valores de V y f .

Paso 2 Obtener el valor de la relación d / f a partir de la Figura 5.

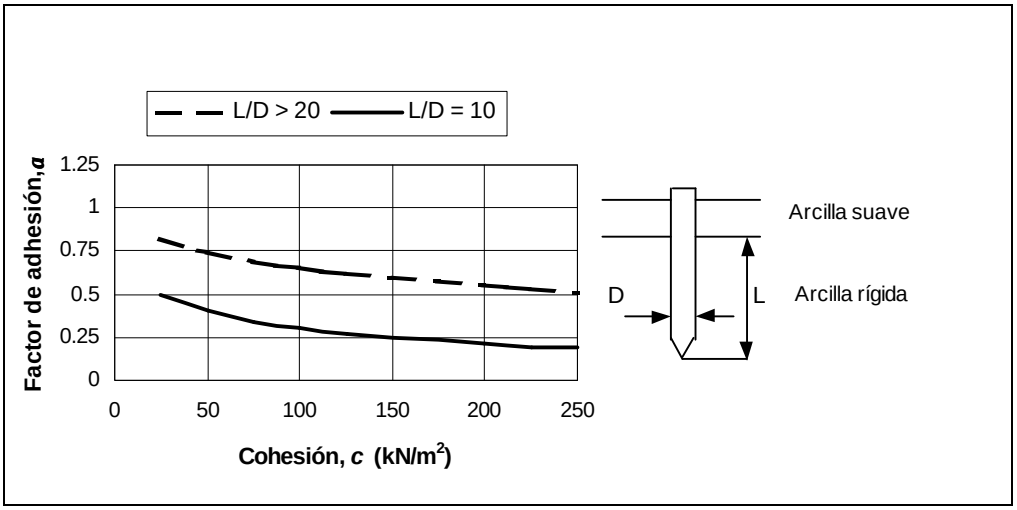
Paso 3 Multiplicar el valor de K_d , obtenido en el Paso 1, por el factor de corrección de la Figura 6 dependiendo del valor de la relación d / f .

Tabla 1 Coeficiente de presión lateral, K_d.

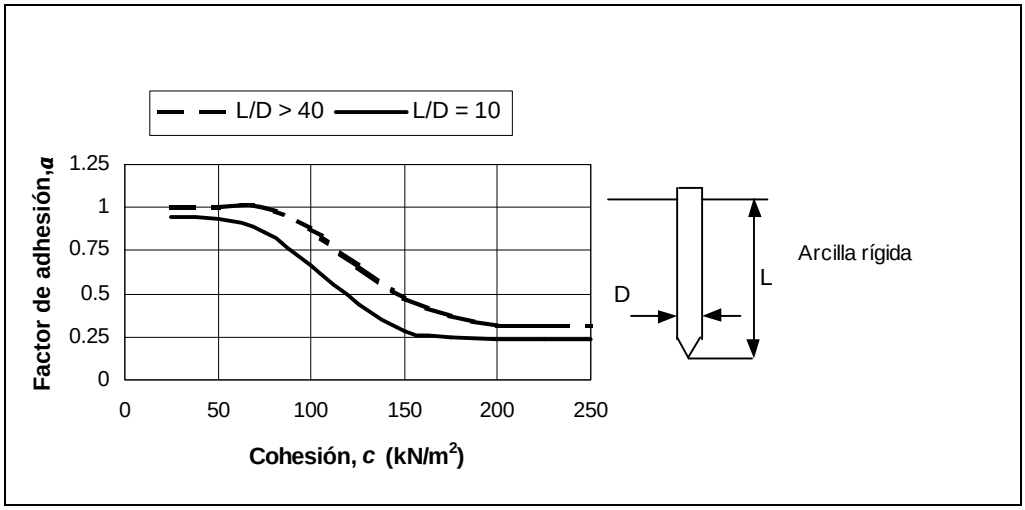
V (m^3/m)	f (º)			
	25	30	35	40
0.0093	0.70	0.85	1.12	1.88
0.0929	0.85	1.15	1.73	3.44
0.9290	1.00	1.45	2.69	4.44



a) Caso 1



b) Caso 2



c) Caso 3

Figura 4 Factor de adhesión para suelos cohesivos

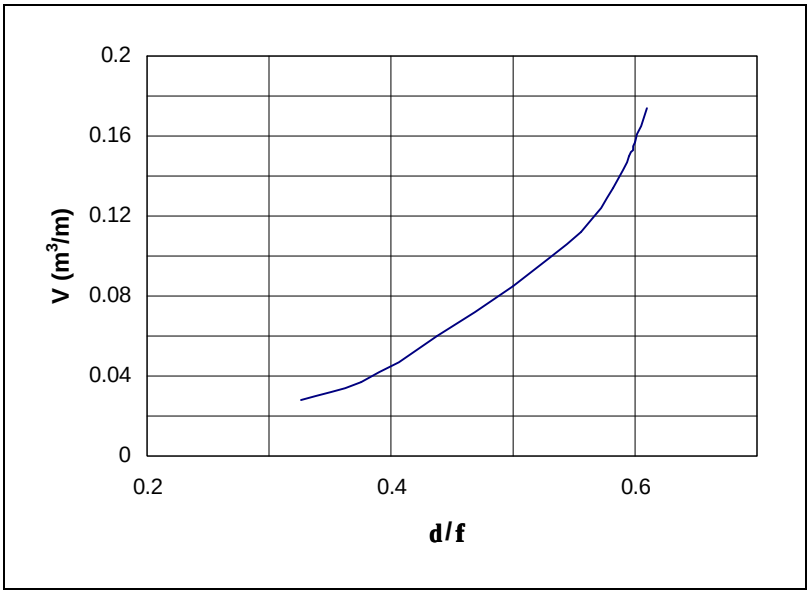


Figura 5 Gráfica para obtener la relación d/f

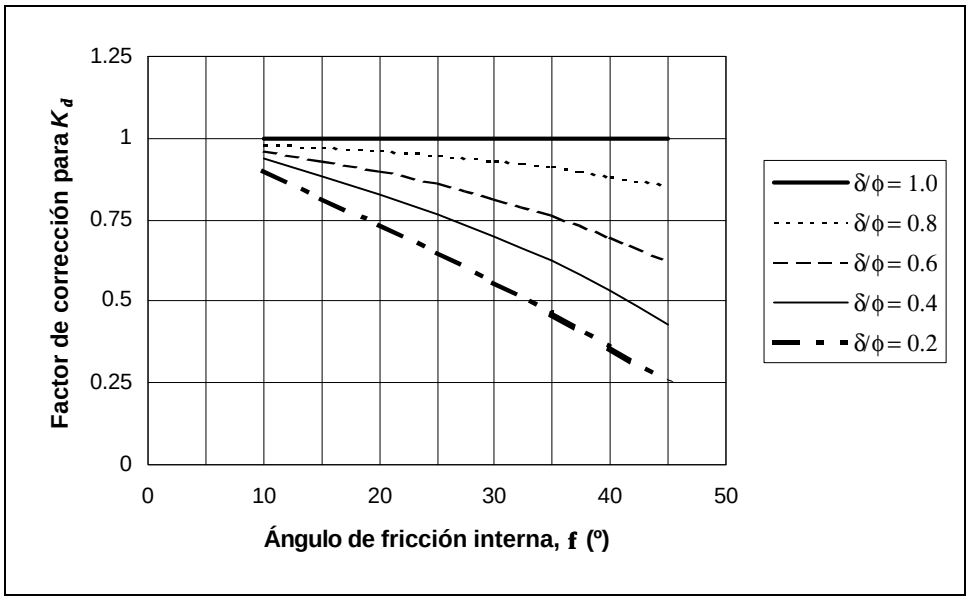


Figura 6 Factor de corrección para K_d

Análisis por Carga Lateral

En el caso de cargas laterales, la dimensión y número de pilotes dependerá de que el pilote más desfavorable debe satisfacer el siguiente requisito:

$$F_{\text{máx}} \leq F_a = \frac{F_u}{FS} \tag{8}$$

Donde:

$F_{máx}$ Carga lateral máxima aplicada al pilote debido a las reacciones resultantes (kN).

F_a Capacidad de carga admisible del pilote (kN)

F_u Capacidad de carga lateral última del pilote (kN), calculada a partir de las propiedades de resistencia del subsuelo

FS Factor de Seguridad

En el caso de suelos cohesivos la capacidad de carga lateral última del pilote está dada por (Broms, 1964a):

$$\begin{array}{ll} 0 & si \quad 0 \le y < 1.5D_p \\ 8cD_p & si \quad 1.5D_p \le y \le l_p \end{array} \tag{9}$$

Donde:

y Distancia al nivel del terreno (m)

D_p Diámetro (o ancho B_p) del pilote (m)

c Cohesión del suelo (kN/m^2)

l_p Longitud del pilote (m)

Para suelos no cohesivos la capacidad de carga lateral última del pilote se obtiene mediante (Broms, 1964b):

$$3\gamma_s y D_p K_p \tag{10}$$

Donde:

γ_s Peso específico del suelo (kN/m^3)

K_p Coeficiente de presión lateral pasiva, adimensional

$$= \frac{1+\text{sen}\,\phi}{1-\text{sen}\,\phi}$$

ϕ Ángulo de fricción interna del suelo

PROGRAMA DE CÓMPUTO

Para llevar a cabo el diseño de las cimentaciones profundas con pilotes se desarrolló un programa (Muñoz, 1999) de computadora en lenguaje Visual Basic V3.1. El diagrama de flujo de este programa se muestra en la Figura 7 cuya nomenclatura utilizada es la siguiente:

NP	Número de pilotes
LP	Longitud del pilote por carga axial
PADC	Capacidad de carga admisible de compresión (o tensión) del pilote
LPL	Longitud del pilote por carga lateral
AROR	Capacidad de carga admisible lateral del pilote
LPMAX	Longitud máxima del pilote; fijada por el usuario
NPMAX	Número máximo de pilotes; determinado por la geometría de la torre

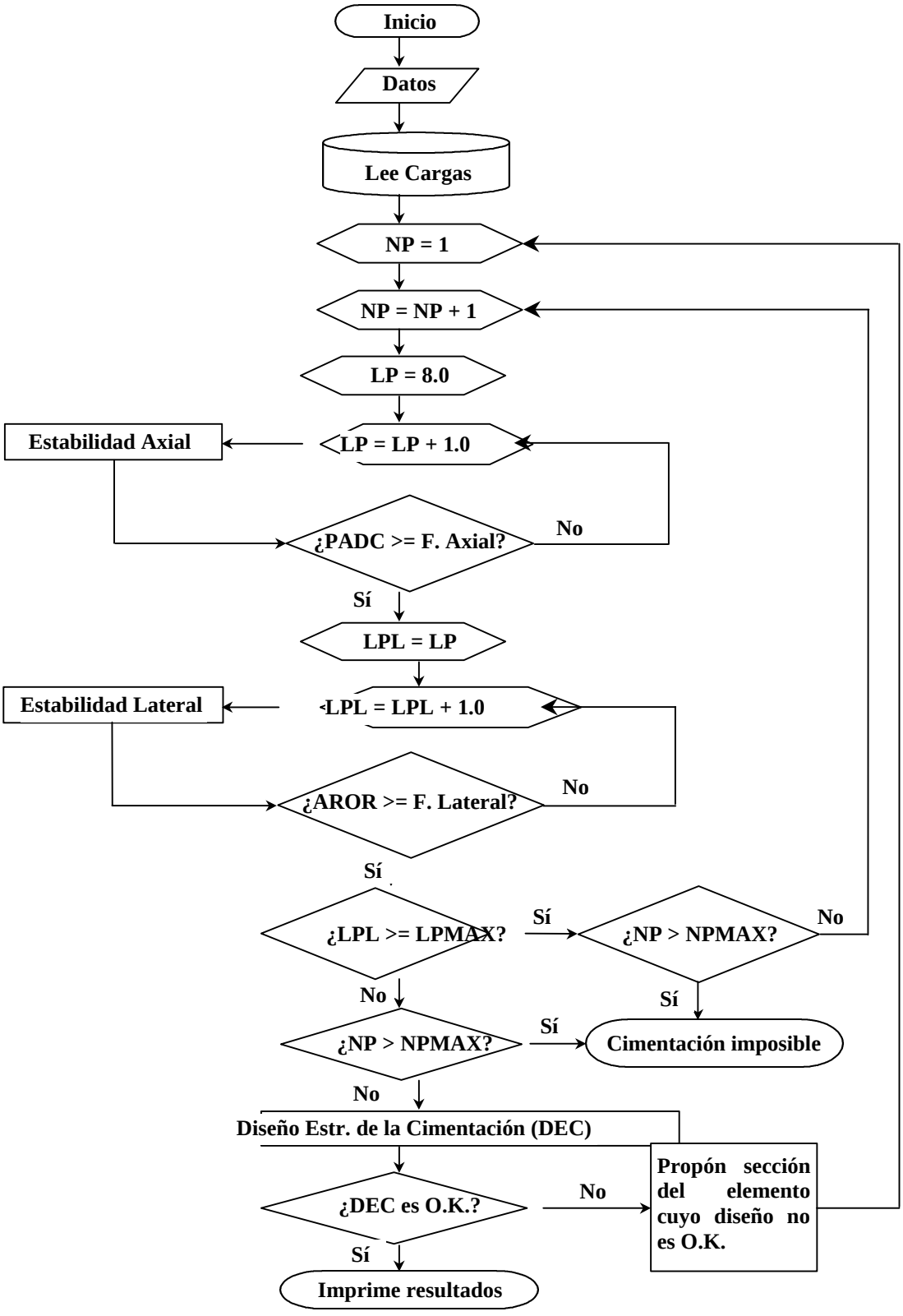


Figura 7 Diagrama de Flujo del programa *PILOTES*

PROCESO DE NORMALIZACIÓN

Conceptos Generales

El proceso de normalización consiste primeramente en analizar y diseñar los componentes de la cimentación (dado, cabezal, pilote y trabe de liga) para una torre en particular y para cada nivel de ésta considerando un conjunto de parámetros del suelo. Una vez realizado el análisis y diseño para cada nivel de la torre, se procede a seleccionar los componentes de la cimentación que sean comunes entre sí para los diferentes niveles de la torre. Este proceso de normalización se realiza mediante una Macro elaborada en EXCEL en donde se leen los archivos de resultados del programa *PILOTES* y se procesa esta información para dar como resultado diferentes tablas que se incluyen en los planos de cimentaciones de la torre en estudio.

Parámetros de los componentes

Los pilotes se limitaron a ser de sección cuadrada de 40 y 45 cm de ancho y tener una longitud máxima de 15 m. Todos los componentes son de concreto reforzado considerando una resistencia mínima a la compresión de 24.53 MPa excepto en los pilotes cuya resistencia mínima fue de 29.43 MPa. El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo se consideró de 412.02 MPa.

Parámetros del Suelo

Para el caso de suelos cohesivos se consideraron tres distintas cohesiones promedio: 13.36, 28.62 y 57.24 kPa, y un peso volumétrico en el intervalo 12.75 – 18.63 kN/m^3. Para suelos no cohesivos se consideraron tres ángulos de fricción interna: 20, 25 y 30º, con sus intervalos de pesos volumétricos de 12.75 – 14.70, 14.71 - 17.15 y 17.16 – 18.63, respectivamente. Para ambos tipos de suelo (cohesivos y no cohesivos) se consideró la condición de suelo húmedo y suelo sumergido. El factor de seguridad fue de 2.5 tanto para el análisis por carga vertical como para el análisis por carga horizontal.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

A manera de ejemplo se presenta la normalización de la cimentación profunda con base en pilotes de una torre de 115 kV de suspensión de claros cortos de un circuito y un conductor por fase; con estos parámetros la torre recibe el nombre de Torre 1A11. Los resultados del proceso de normalización se presentan en las Tablas 2 – 6. Aun cuando no se presenta, el programa de normalización de cimentaciones profundas también muestra las distancias entre muescas las cuales sirven como puntos de referencia para localizar las coordenadas de los componentes de la cimentación. La nomenclatura empleada en las Tablas 2 – 6 es la siguiente:

TS	Tipo de Suelo, Cohesivo o Friccionante
$C.P.$	Cohesión Promedio
$P.Vol.$	Peso Volumétrico
f	Ángulo de Fricción Interna
CS	Condición del Suelo, Húmedo o Sumergido
NP	Número de Pilotes por pata
AC	Ancho del Cabezal
PC	Peralte del Cabezal

Tabla 2 Diseño de los cabezales

SUELO					NIVEL	CABEZAL									
						DIMENSIONES						REFUERZO			
TS	*C. P.*	*P. Vol.*	*f(º)*	*CS*		*NP*	*AC*		*PC*	*LC*		*VLSC*	*VLIC*	*VAC*	*VTC*	*LDC*
							AP = 40	*AP = 45*		*AP = 40*	*AP = 45*					
Los indicados en pilotes					Todos	2 a 5 8 a 9	100	105	100	340 580	375 645	7P. 1V. # 8	7P. 1V. # 8	10P. 1V. # 3	#3 @ 17.0	32.3

Tabla 3 Diseño de las trabes de liga

SUELO					NIVEL	TRABE DE LIGA							
						DIMENSIONES			REFUERZO				
TS	*C. P.*	*P. Vol.*	*f(º)*	*CS*		*AT*	*PT*	*LT*	*VLST*	*VLIT*	*VAT*	*VIT*	*LDT*
Los indicados en pilotes					Todos	30	60	Variable	2P. 1V. # 8	2P. 1V. # 8	4P. 1V. # 3	#3 @ 26.0	40

Tabla 4 Diseño de los dados

SUELO					NIVEL	DADO									
						DIMENSIONES					REFUERZO				
TS	*C. P.*	*P. Vol.*	*f(º)*	*CS*		*Ancho*	*Diám.*	*E*	*EX*	*EY*	*VLD*	*VLD'*	*VT1D*	*VT1D'*	*LDD*
Los indicados en pilotes					Todos	50		30.5	2.6	2.6	4P. 1V. # 8	4P. 1V. # 8	#3 @ 21.0	#3 @ 21.0	82.3
							50	30.5	2.6	2.6	7P. 1V. # 6	---	#3 @ 7.0	---	84.9

Tabla 5 Diseño de los pilotes

SUELO					NIVEL	PILOTE							
						DIMENSIONES				REFUERZO			
TS	*C. P.*	*P. Vol.*	*f(º)*	*CS*		*NP*	*AP*	*LPL*	*LPTO*	*VLP*	*VT1P, VT1P'*	*VT2P, VT2P'*	*LDP*
C	13.73	12.75 – 18.63	0	H	-6 a –3	3	40	1400	1500	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
					+0 a +3	4	40	1400	1500	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
					+6 a +9	5	40	1200	1300	4P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
C	13.73	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +6	3	40	1400	1500	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
					+9 a +9	4	40	1300	1400	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
C	28.62	12.75 – 18.63	0	H	-6 a +9	2	40	1000	1100	12P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
C	28.62	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +9	2	40	1000	1100	12P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
C	57.24	12.75 – 18.63	0	H	-6 a +9	2	40	800	900	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
C	57.24	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +9	2	40	800	900	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
F	0	12.75 – 14.71	20	H	-6 a +0	3	40	1400	1500	12P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
					+3 a +9	4	40	1400	1500	12P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
F	0	14.71 – 17.16	25	H	-6 a +3	2	40	1100	1200	12P. 1V. #10	#3 @ 17.0	#4 @ 8.5	90.6
					+6 a +9	3	40	900	1000	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
F	0	4.90 – 7.35	25	S	-6 a –3	5	40	1400	1500	4P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
					+0 a +9	8	40	1300	1400	4P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
F	0	17.16 – 18.63	30	H	-6 a +9	2	40	800	900	12P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6
F	0	7.35 – 8.83	30	S	-6 a +3	2	40	1100	1200	12P. 1V. #10	#3 @ 17.0	#4 @ 8.5	90.6
					+6 a +9	3	40	900	1000	8P. 1V. # 8	#3 @ 17.0	#3 @ 8.5	90.6

Tabla 6 Volúmenes de obra por torre

SUELO					NIVEL	VOLÚMENES DE OBRA POR TORRE						
						Plantilla	*Cimbra*	*Concreto (m3)*		*Acero*	*Hincado*	*Demolido*
TS	*C. P.*	*P. Vol.*	*f(º)*	*CS*		*m3*	*m2*	*(1)*	*(2)*	*kN*	*ml*	*ml*
C	13.73	12.75 – 18.63	0	H	-6 a -3 +0 a +3 +6 a +9	0.76 1.32 1.35	267.08 367.17 396.00	28.80 38.40 41.60	15.93 26.87 27.59	106.77 151.91 117.77	168.0 224.0 240.0	10.8 14.4 18.0
C	13.73	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +6 +9 a +9	0.84 1.38	273.38 352.80	28.80 35.84	16.88 27.59	107.62 145.55	168.0 208.0	10.8 14.4
C	28.62	12.75 – 18.63	0	H	-6 a +9	0.89	164.69	14.08	17.14	80.55	80.0	7.2
C	28.62	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +9	0.89	164.69	14.08	17.14	80.55	80.0	7.2
C	57.24	12.75 – 18.63	0	H	-6 a +9	0.89	145.49	11.52	17.14	57.41	64.0	7.2
C	57.24	2.94 – 8.83	0	S	-6 a +9	0.89	145.49	11.52	17.14	57.41	64.0	7.2
F	0	12.75 – 14.71	20	H	-6 a +0 +3 a +9	0.79 1.38	269.97 372.00	28.80 38.40	16.37 27.59	138.64 194.64	168.0 224.0	10.8 14.4
F	0	14.71 – 17.16	25	H	-6 a +3 +6 a +9	0.85 0.86	170.88 203.09	15.36 19.20	16.62 17.14	119.97 81.17	88.0 108.0	7.2 10.8
F	0	4.90 – 7.35	25	S	-6 a -3 +0 a +9	1.20 2.21	432.65 660.00	48.00 71.68	25.89 46.79	126.94 189.89	280.0 416.0	18.0 28.8
F	0	17.16 – 18.63	30	H	-6 a +9	0.89	145.49	11.52	17.14	70.89	64.0	7.2
F	0	7.35 – 8.83	30	S	-6 a +3 +6 a +9	0.85 0.86	170.88 203.09	15.36 19.20	16.62 17.14	119.97 81.17	88.0 108.0	7.2 10.8

LC	Longitud del Cabezal
VLSC	Varillas Longitudinales del Lecho Superior del Cabezal
VLIC	Varillas Longitudinales del Lecho Inferior del Cabezal
VAC	Varillas Auxiliares (Longitudinales) del Cabezal
VTC	Refuerzo Transversal del Cabezal (Estribos)
LDC	Longitud de Desarrollo de las varillas longitudinales del Cabezal

Para la Trabe de Liga solamente se sustituye la *C* por la *T*.

Ancho	Ancho del Dado para secciones cuadradas
Diám.	Diámetro del Dado para secciones circulares
E	Altura del Dado con respecto a la parte superior del cabezal
EX	Excentricidad del extremo superior del Dado con respecto al centro del cabezal
EY	Excentricidad del extremo superior del Dado con respecto al centro del cabezal
VLD	Varillas Longitudinales del Dado
VLD'	Varillas Longitudinales del Dado
*VT*1*D*	Refuerzo Transversal del Dado (Estribos en secciones cuadradas y espirales en secciones circulares)
*VT*1*D*'	Refuerzo Transversal del Dado solamente en secciones cuadradas (Estribos)
LDD	Longitud de Desarrollo de las varillas longitudinales del Dado

AP	Ancho del Pilote
LPL	Longitud enterrada del Pilote
LPTO	Longitud Total del Pilote
*VT*1*P*	Refuerzo Transversal del Pilote (Estribos)
*VT*1*P*'	Refuerzo Transversal del Pilote (Estribos)
*VT*2*P*	Refuerzo Transversal del Pilote (Estribos en los extremos del pilote)
*VT*2*P*'	Refuerzo Transversal del Pilote (Estribos en los extremos del pilote)
LDP	Longitud de Desarrollo de las varillas longitudinales del Pilote

(1)	Concreto de $f_c' = 29.43$ Mpa
(2)	Concreto de $f_c' = 24.53$ Mpa

CONCLUSIONES

Se ha presentado un proceso para la normalización de cimentaciones profundas con base en pilotes para torres de transmisión auto soportadas. La normalización de este tipo de cimentaciones resulta beneficiosa debido a que se pueden reducir los costos de diseño de las cimentaciones, se aprovechan los materiales en forma óptima y se reduce el tiempo de ejecución de la obra debido a que el proceso de fabricación de los pilotes puede hacerse en serie e incluso contar con un “stock” de los mismos. Asimismo, la normalización ayudará a los equipos de ingenieros distribuidos en las distintas regiones del país para llevar a cabo la supervisión del proceso constructivo además de poder tener la información del diseño de las cimentaciones a través de los nuevos medios de comunicación electrónica como lo es la Internet.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación (CPTT) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) su patrocinio para la elaboración del proyecto con base en el cual se desarrolló este trabajo.

REFERENCIAS

American Concrete Institute (1995), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-95) and Commentary (ACI318R-95)".

Bowles J. E. (1977), "Foundation Analysis and Design", McGraw Hill, Second Edition.

Broms B. B. (1964a), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", American Society of Civil Engineers, *Journal of Soils Mechanics and Foundation Division*, march.

Broms B. B. (1964b), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", American Society of Civil Engineers, *Journal of Soils Mechanics and Foundation Division*, may.

Muñoz C. J. y Guerrero V. (1999), "Manual de Usuario para el Módulo Pilotes del Programa DIN CCR-98", Informe No. IIE/42/11142/I07/P/C, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Tomlinson M. J. (1996), "Cimentaciones, Diseño y Construcción", Editorial Trillas, Primera Edición.